

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»
(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ПРОМИСЛОВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА
ЕКОЛОГІЇ
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 666.1.022.1

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
« ____ » _____ 2025р

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»

з напрямку підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

на тему: Автоматизація процесу виробництва стиролу

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛК-42мп
(шифр групи)

Целоусов Владислав Сергійович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник ас. PhD Жученко Л.К.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань
Студент _____
(підпис)

Київ - 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет автоматизації, промислової інженерії та робототехніки
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Напрямок підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Целоусов Владислав Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу виробництва стиролу

керівник проекту _____
ас., PhD Жученко Л.К.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025р. №4744-с.

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процес гідроочищення нафтових масел _____

4. Вихідні дані: Схема автоматизації; система керування яка має забезпечувати перерегулювання не більше 15%, час перехідного процесу не більше заданим технічним завданням; параметри які підлягають керуванню: вихідна температура суміші та концентрація з ректора, витата пального, витрата та концентрація суміші на вході до ректора

5. Перелік завдань, що потребують розробки: Дослідити процес виробництва стиролу; розробка математичної моделі реактора як технологічного об'єкту

керування; спроектувати та дослідити нечітку систему керування реактором; розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу Графічні зображення об'єкту керування; схема процесу гідроочищення виробництва стиролу; перехідні характеристики об'єкту; зображення розробленої систем керування; перехідні процеси системи керування.

7. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Ознайомлення з теоретичним матеріалом		
2	Створення математичної моделі об'єкта		
3	Синтез нечіткої системи керування		
4	Аналіз отриманих результатів		
5	Проектування схеми автоматизації		
6	Створення стартап проекту		

Студент _____

Владислав ЦЕЛОУСОВ
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

Людмила ЖУЧЕНКО
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація записку об'ємом 63 сторінок, 15 рисунків, 1 креслення і 21 літературних джерел.

Основною метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю хіміко технологічного процесу виробництва стиролу, для забезпечення мінімального використання людських ресурсів в роботу процесу, також збільшення ефективності використання робочого продукту та мінімізацію затрат енергетичних ресурсів.

У дисертації розроблено схему автоматизації з технологічною сигналізацією та блокуванням роботи процесу.

Одним з основних апаратів, що забезпечує якість технологічного процесу виступає реактор, для якого розроблено та досліджені математична модель статичного та динамічного режимів роботи та побудовано перехідні характеристики за каналами керування.

Проведено синтез системи керування з використанням нечітких алгоритмів. Наведено обґрунтування використання даного типу систем та представлено аналіз переваги використання нечіткої системи керування.

Всі дані, що використані в системі керування отримані із виробництва та процес синтезу системи відбувається із порівнянням результатів роботи системи із реальними.

Розроблено стартап проекту, що дозволив виявити економічну доцільність прийнятих технічних рішень.

Ключові слова: стирол, реактор, об'єкт керування, схема автоматизації, математична модель, статична характеристика, передатна функція, перехідна характеристика, канал керування, нечітка система керування, нечіткої регулятор, база правил.

ABSTRACT

Master's thesis note with a volume of 63 pages, 15 figures, 1 drawing and 21 literary sources.

The main purpose of the dissertation is to develop a system for automatic control of the chemical and technological process of styrene production, to ensure minimal use of human resources in the process, as well as increase the efficiency of the use of the working product and minimize the cost of energy resources.

The dissertation has developed an automation scheme with technological signaling and blocking of the process.

One of the main devices that ensures the quality of the technological process is the reactor, for which a mathematical model of static and dynamic operating modes has been developed and studied and transient characteristics have been constructed for the control channels.

A control system has been synthesized using fuzzy algorithms. A justification for the use of this type of system is given and an analysis of the advantages of using a fuzzy control system is presented.

All data used in the control system are obtained from production and the system synthesis process is carried out by comparing the results of the system with real ones.

A startup project was developed, which allowed to identify the economic feasibility of the adopted technical solutions.

Keywords: styrene, reactor, control object, automation scheme, mathematical model, static characteristic, transfer function, transient characteristic, control channel, fuzzy control system, fuzzy controller, rule base.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА СТИРОЛУ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	9
1.1. Загальна характеристика стиролу та сфери його застосування	9
1.2. Аналіз існуючих систем автоматизації.....	11
1.3. Постановка задачі на дослідження.....	13
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....	14
2.1. Дослідження об'єкту керування.....	14
2.2. Моделювання динамічного режиму роботи печі.....	16
3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	20
3.1. Синтез одноконтурної замкненої системи керування.....	20
3.3. Синтез нечіткої системи керування.....	24
4. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА СТИРОЛУ.....	30
4.1 Архітектура автоматизованої системи керування.....	30
4.2 Функціональна схема автоматизації	31
4.3. SCADA-система технологічного процесу	34
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	45
5.1. Поняття стартап-проекту.....	45
5.2. Технологічний аудит проекту.....	49
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	68

ВСТУП

Актуальність теми. Стирол є одним з найважливіших продуктів нафтохімічної промисловості, який широко використовується для виробництва полістиролу, синтетичних каучуків, АБС-пластиків, поліефірних смол та інших полімерних матеріалів. Зростання попиту на полімерну продукцію зумовлює необхідність підвищення ефективності, безпеки та екологічності процесів виробництва стиролу [1].

Технологічний процес отримання стиролу, що базується переважно на каталітичному дегідруванні етилбензену, характеризується високими температурами, значним енергоспоживанням, складною динамікою та підвищеною вибухо- і пожежонебезпечністю [1]. Нестабільність режимів роботи реакторів і ректифікаційних колон може призводити до зниження виходу цільового продукту, підвищення утворення побічних компонентів і зростання експлуатаційних витрат.

У сучасних умовах підвищення вимог до якості продукції, енергоефективності та промислової безпеки зумовлює необхідність впровадження ефективних автоматизованих систем керування технологічними процесами. Використання сучасних засобів автоматизації, SCADA-систем, а також вдосконалених алгоритмів керування (ПД, каскадного, адаптивного та прогнозного керування) дозволяє забезпечити оптимальні режими роботи установки виробництва стиролу, підвищити стабільність процесу та зменшити вплив людського фактору [2].

Таким чином, дослідження та розробка системи автоматизації процесу виробництва стиролу є актуальним науково-технічним завданням, що має важливе практичне значення для підприємств нафтохімічної галузі.

Метою магістерської дисертації є розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом виробництва стиролу, яка забезпечує підвищення ефективності, стабільності та безпеки технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технологічний процес виробництва стиролу та особливості його керування;
- дослідити існуючі системи автоматизації та сучасні підходи до керування нафтохімічними процесами;
- розробити математичну модель основних апаратів установки виробництва стиролу;
- виконати синтез системи автоматичного керування з використанням сучасних алгоритмів регулювання;
- провести імітаційне моделювання роботи системи керування та проаналізувати її ефективність;
- розробити програмно-технічну реалізацію системи автоматизації з використанням SCADA-системи;
- оцінити економічну ефективність впровадження запропонованої системи автоматизації.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва стиролу на основі дегідрування етилбензену [1].

Предметом дослідження є методи та засоби автоматизації і керування технологічними параметрами процесу виробництва стиролу, а також алгоритми регулювання, що забезпечують оптимальні режими роботи установки.

У роботі використано такі методи дослідження [1]:

- методи теорії автоматичного керування;
- математичне моделювання технологічних процесів;
- методи лінеаризації та аналізу динамічних систем;
- імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink;
- методи синтезу ПД-, каскадних та прогнозних регуляторів;
- техніко-економічний аналіз ефективності автоматизації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у [1, 3]:

- розробці математичної моделі технологічного процесу виробництва стиролу, придатної для синтезу систем автоматичного керування;
- удосконаленні структури системи керування шляхом поєднання класичних та сучасних алгоритмів регулювання;
- дослідженні впливу автоматизації на стабільність та енергоефективність процесу виробництва стиролу.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для [1]:

- впровадження автоматизованої системи керування на промислових установках виробництва стиролу;
- підвищення виходу цільового продукту та зменшення енерговитрат;
- покращення умов промислової безпеки та зниження аварійності;
- використання матеріалів роботи в навчальному процесі при підготовці фахівців з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА СТИРОЛУ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Загальна характеристика стиролу та сфери його застосування

Стирол (вінілбензен) є ароматичним ненасиченим вуглеводнем з хімічною формулою $C_6H_5-CH=CH_2$. За нормальних умов стирол являє собою безбарвну або слабко-жовту рідину з характерним запахом, яка добре розчиняється в органічних розчинниках і обмежено — у воді. Стирол є хімічно активною сполукою, схильною до полімеризації, що зумовлює особливі вимоги до умов його зберігання та транспортування [3].

Основним напрямком використання стиролу є виробництво полімерних матеріалів, зокрема полістиролу загального призначення, ударостійкого полістиролу, АБС-пластиків, синтетичних каучуків, латексів та поліефірних смол. Завдяки широкому спектру застосування попит на стирол залишається стабільно високим, що обумовлює необхідність постійного вдосконалення технологій його виробництва [3].

Значна частина світового виробництва стиролу припдіна до великих нафтохімічних комплексів, де процеси отримання сировини, переробки та очистки інтегровані в єдину технологічну схему. Це створює додаткові вимоги до надійності та узгодженості систем автоматизації [1, 4].

Опис технологічного процесу виробництва стиролу

Найбільш поширеним промисловим методом виробництва стиролу є каталітичне дегідрування етилбензену у газовій фазі. Процес здійснюється за високих температур (550–650 °C) у присутності залізооксидних каталізаторів з домішками калію та хрому [5].

Основна хімічна реакція має вигляд: $\text{C}_6\text{H}_5\text{—CH}_2\text{—CH}_3 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{—CH=CH}_2 + \text{H}_2$

Дегідрування етилбензену є ендотермічним процесом, тому для підтримання необхідної температури в реактор подається перегріта водяна пара. Пара також зменшує парціальний тиск реагентів, що сприяє зсуву рівноваги в бік утворення стиролу та зменшенню коксоутворення на каталізаторі [5].

Технологічна схема установки виробництва стиролу включає такі основні етапи:

- підготовку та підігрів етилбензену;
- змішування сировини з перегрітою парою;
- каталітичне дегідрування в трубчастому реакторі;
- охолодження та конденсацію реакційної суміші;
- розділення продуктів у системі ректифікаційних колон;
- стабілізацію та зберігання готового стиролу.

Ректифікаційний блок призначений для відділення водню, непрореагованого етилбензену, побічних продуктів та отримання стиролу заданої чистоти. Саме цей етап характеризується складною багатопараметричною динамікою, що ускладнює задачу автоматичного керування [5].

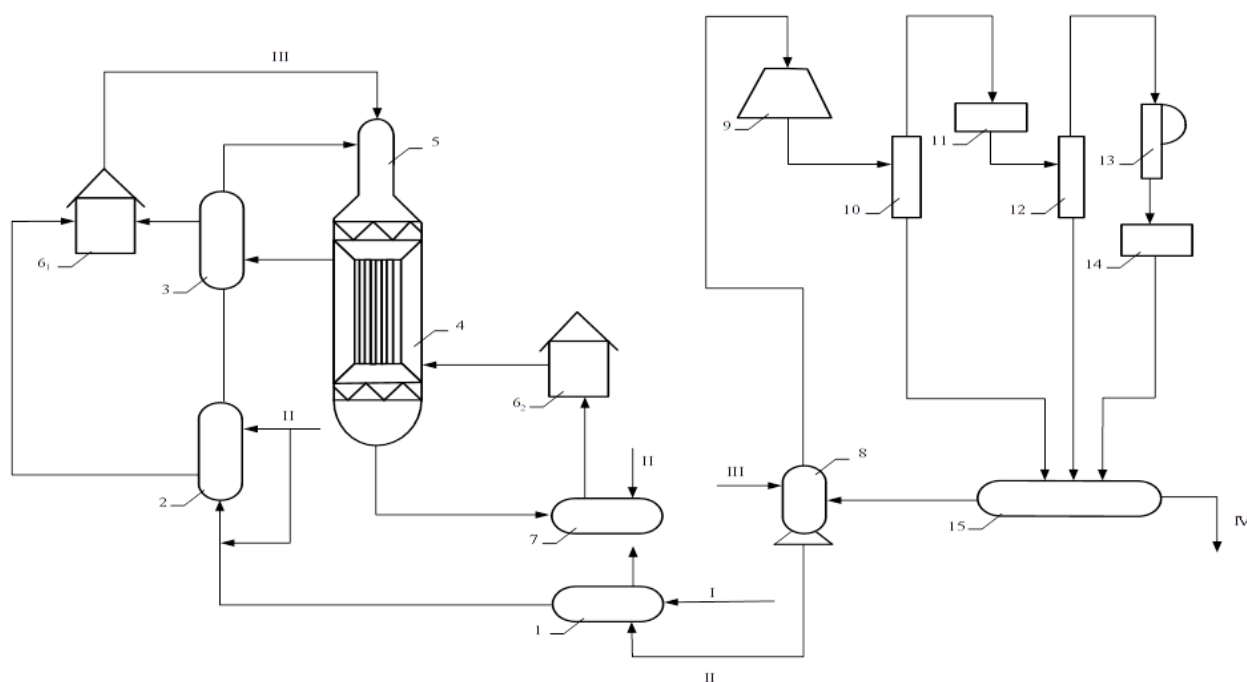


Рисунок 1.1 Технологічна схема установки виробництва стиролу

На схемі представлено: 1 – теплообмінник; 2 – випарник; 3, 4 – перегрівач; 5 – реактор; 6 – піч; 7 – котел-утилизатор; 8 – пінний апарат; 9, 14 – конденсатор; 10, 11, 12 – сепаратори; 13 – компресор; 15 – відстійник.

1.2. Аналіз існуючих систем автоматизації

Процес виробництва стиролу належить до категорії підвищеної небезпеки, що обумовлено високими температурами, тисками, а також токсичністю та вибухонебезпечністю продуктів реакції. Водень, який утворюється під час дегідрування, є легкозаймистим газом і потребує постійного контролю концентрації [4].

Основними небезпечними факторами є:

- перевищення температури в реакторі, що може призвести до дезактивації каталізатора або аварійної ситуації;
- коливання тиску в реакційній зоні;

- нестабільність складу сировини;
- ризик полімеризації стиролу під час зберігання та транспортування.

З огляду на це система автоматизації повинна забезпечувати [6]:

- безперервний контроль технологічних параметрів;
- швидке реагування на збурення;
- автоматичний захист і аварійне відключення;
- мінімізацію впливу людського фактора.

На більшості промислових установок виробництва стиролу застосовуються розподілені системи керування (DCS), які поєднують локальні контролери з централізованими операторськими станціями. Класичним рішенням є використання ПІД-регуляторів для стабілізації температури, тиску та витрат [2].

Однак класичні методи регулювання не завжди забезпечують оптимальну якість керування в умовах нелінійності та значних затримок. Тому на сучасних підприємствах впроваджуються системи вдосконаленого керування процесами (APC), зокрема регулятори з прогновною моделлю (MPC) [7].

Застосування SCADA-систем дозволяє:

- візуалізувати стан технологічного процесу;
- вести архів параметрів;
- реалізувати систему тривоги і повідомлень;
- аналізувати ефективність роботи установки.

Інтеграція систем автоматизації з рівнем керування підприємством (MES, ERP) створює передумови для реалізації концепції «цифрового виробництва».

Проведено аналіз технології виробництва стиролу та особливостей її автоматизації. Встановлено, що процес дегідрування етилбензену характеризується складною динамікою, високою енергоємністю та підвищеними вимогами до безпеки [2, 4, 7]. Аналіз сучасних систем керування показав доцільність використання інтегрованих автоматизованих систем з елементами прогностного керування, що забезпечують підвищення ефективності та надійності процесу виробництва стиролу.

1.3. Постановка задачі на дослідження

Метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю виробництва стиролу. Це включає розробку математичної моделі об'єкту керування, синтез системи керування, створення схеми автоматизації.

Основні задачі дослідження включають:

- математичну модель об'єкту керування – реактора;
- синтез систем керування різних типів регуляторів;
- створення схеми автоматизації технологічного процесу;
- створення SCADA-системи;
- розробка стартап проекту.

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

2.1. Дослідження об'єкту керування

Процес дегідрування етилбензену до стиролу є основною стадією виробництва та визначає техніко-економічні показники всієї установки. Реактор являє собою трубчастий апарат з нерухомим шаром каталізатора, в якому процес відбувається в газовій фазі за високих температур [9].

Хімічні реакції процесу.



Побічні реакції [9]:

- крекінг етилбензену;
- утворення толуолу;
- полімеризація стиролу.

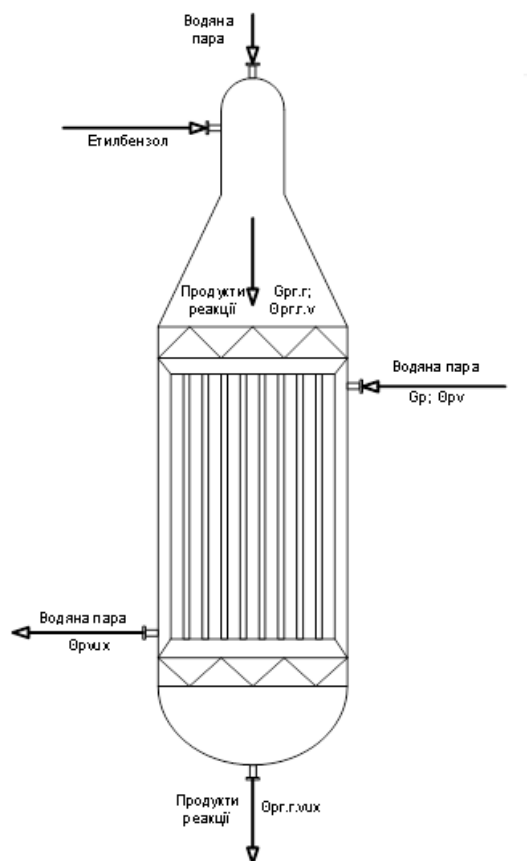


Рисунок. 2.1. Схема реактора безперервної дії з перемішуванням.

Наявність побічних реакцій негативно впливає на селективність процесу, що зумовлює необхідність точного температурного керування [10].

Матеріальні баланси

Для спрощеної динамічної моделі використовується підхід ідеально змішаного реактора. Матеріальний баланс для етилбензену має вигляд [11]:

$$\frac{dC_{EB}}{dt} = \frac{F}{V}(C_{EB}^{in} - C_{EB}) - k(T) \cdot C_{EB}$$

Де $k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ — температурно-залежна константа швидкості реакції.

Матеріальний баланс для стиролу:

$$\frac{dC_{ST}}{dt} = -\frac{F}{V}C_{ST} + k(T) \cdot C_{EB}$$

Тепловий баланс реактора

Тепловий баланс з урахуванням ендотермічного характеру реакції [11]:

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = F \rho c_p (T^{in} - T) + Q_{steam} - \Delta H_r \cdot V \cdot k(T) C_{EB}$$

де Q_{steam} — тепловий потік від перегрітої пари.

Це рівняння показує сильну взаємозалежність температури та швидкості реакції, що є ключовим фактором у задачах керування [11].

2.2. Моделювання динамічного режиму печі

Для синтезу регуляторів модель повинна бути приведена до лінійного вигляду. Лінеаризація виконується в околі номінального режиму (C_{EB0}, T_0) [11].

Лінеаризація нелінійних рівнянь

Рівняння теплового балансу після лінеаризації [11]:

$$\Delta \dot{T} = a_{11} \Delta T + a_{12} \Delta C_{EB} + b_1 \Delta Q_{steam}$$

Рівняння матеріального балансу:

$$\Delta \dot{C}_{EB} = a_{21} \Delta T + a_{22} \Delta C_{EB} + b_2 \Delta F$$

Коефіцієнти a_{ij} визначаються як часткові похідні від нелінійних функцій.

Передатні функції та часові характеристики [11]

Після перетворення Лапласа отримано передатну функцію температурного каналу:

$$G_T(s) = \frac{K_T e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

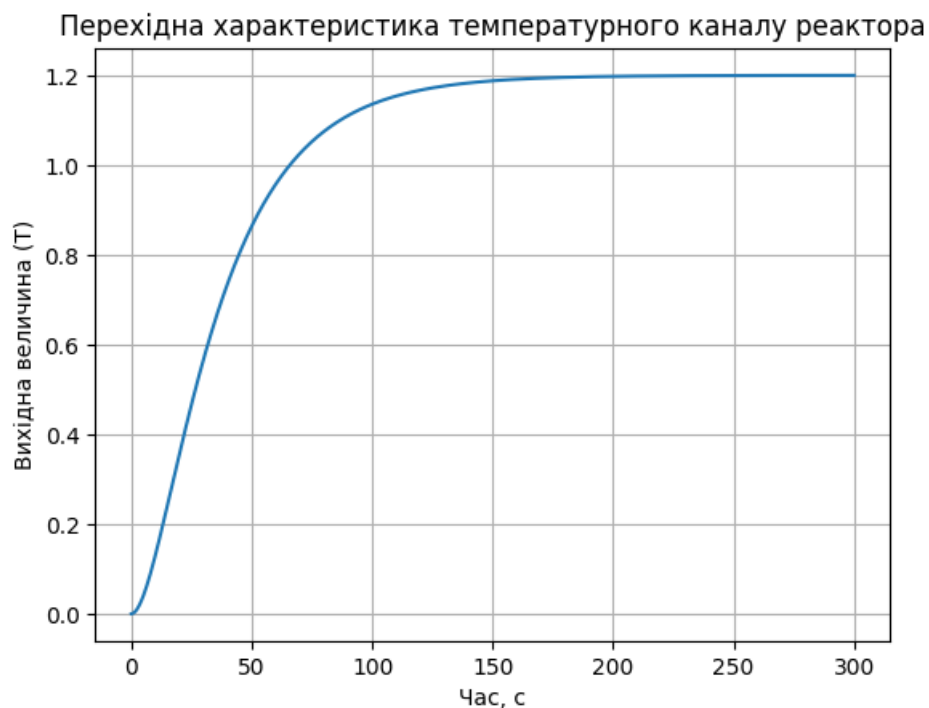


Рисунок 2.2 Перехідна характеристика температурного каналу

Аналіз показує [11]:

- аперіодичний характер перехідного процесу;
- значне транспортне запізнення;
- чутливість до зміни параметрів.

Аналіз стійкості та керованості

Для лінеаризованої моделі проведено:

- аналіз власних значень матриці стану;
- перевірку умов керованості та спостережуваності;
- оцінку запасів стійкості за критеріями Найквіста та Боде.

Отримані результати підтвердили доцільність використання багатоконтурного та прогнозного керування [11].

Обґрунтування вибору регульованих і керуючих змінних

Регульовані параметри процесу

Основними параметрами, що визначають якість процесу, є [11]:

- температура в зоні реакції;
- концентрація стиrolу на виході;
- співвідношення «пара–сировина»;
- тиск у реакторі.

Контроль температури є критичним, оскільки навіть незначні відхилення призводять до різкого зниження селективності.

Керуючі та збурюючі впливи

Керуючі впливи:

- витрата перегрітої пари;
- витрата етилбензену;
- температура підігріву сировини.

Основні збурення [11]:

- коливання якості сировини;
- деградація каталізатора;

- зміна теплотворної здатності пари.

Структурна взаємодія змінних [11]

Аналіз коефіцієнтів підсилення показав сильну взаємодію між каналами «витрата пари – температура» та «витрата сировини – концентрація». Це унеможлиблює ефективне одноконтурне керування та підтверджує необхідність каскадних і МРС-регуляторів.

3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Синтез одноконтурної замкненої системи керування

Для налаштування PID-регулятора використано метод Зіглера–Ніколса за передатною функцією з подальшим уточненням параметрів з урахуванням вимог до безперегулювального режиму. Задача вирішена із реалізацією одноконтурної замкненої системи керування з ПІД-регулятором [12].

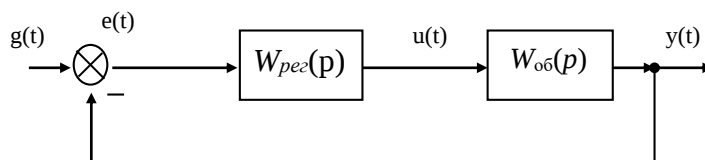


Рисунок 3.1 Структурна схема системи керування

Об'єкт представлений аперіодичною ланкою другого порядку, з запізнювання. З параметрами, що були розраховані в розділі 2.

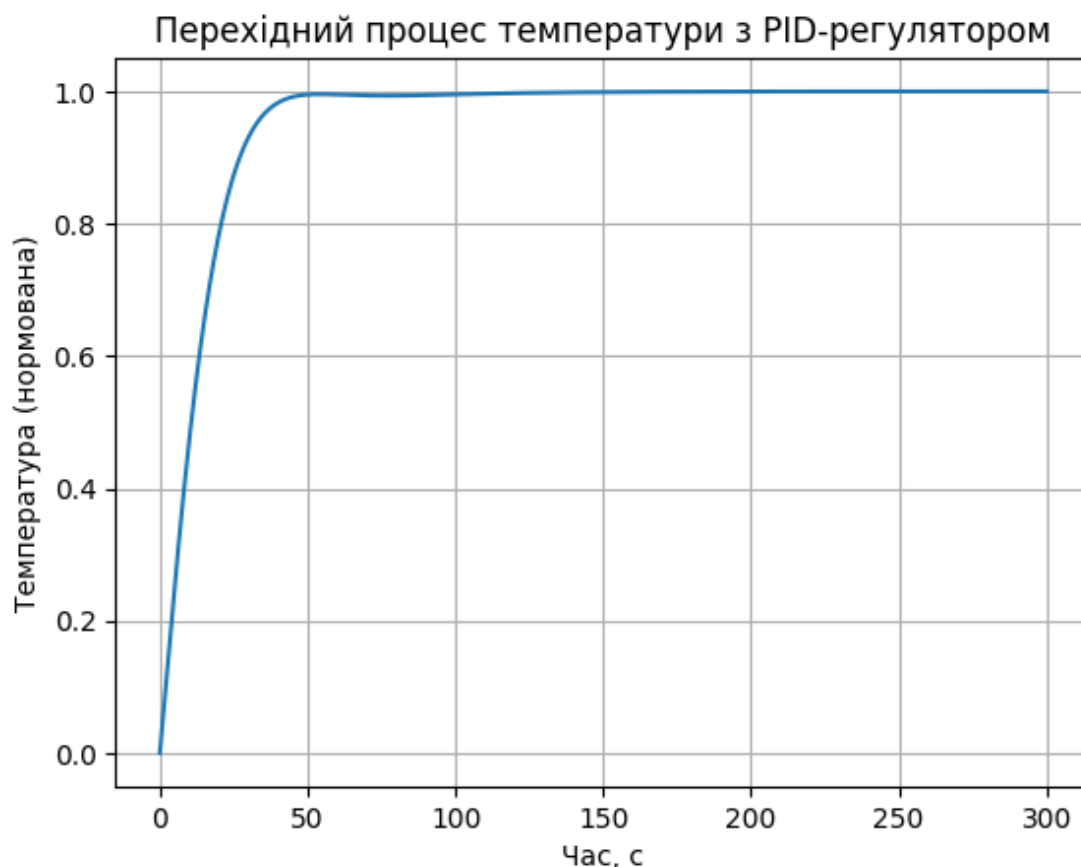


Рисунок 3.2 Перехідний процес замкненої одноконтурної системи керування з ПІД регулятором

Отримані параметри забезпечують:

- мінімальне перерегулювання ($<5\%$);
- час встановлення $\approx 60\text{--}80\text{ с}$;
- стійку роботу при збуреннях.

Каскадна система керування температурою [12]

Для підвищення якості регулювання запропоновано каскадну структуру:

- зовнішній контур — температура реактора;
- внутрішній контур — витрата перегрітої пари.

Переваги каскадного керування:

- швидка компенсація збурень по парі;
- зменшення навантаження на основний PID-регулятор;
- підвищення стабільності процесу.

Внутрішній контур має малу інерційність ($T \approx 5\text{--}8\text{ с}$), що дозволяє застосувати PI-регулятор.

MPC-регулятор [13]

Для оптимізації роботи установки в широкому діапазоні режимів застосовано Model Predictive Control (MPC).

Параметри MPC-регулятора

- горизонт прогнозування:

$$N_p = 20, N_{p_p} = 20, N_p = 20$$

- горизонт керування:

$$N_c = 5N_c = 5N_c = 5$$

- обмеження температури:

$$580 \leq T \leq 620 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 580 \leq T \leq 620 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- обмеження витрати пари:

$$0 \leq u \leq 100\% \quad 0 \leq u \leq 100\% \quad 0 \leq u \leq 100\%$$

MPC-регулятор мінімізує функціонал:

$$J = \sum_{k=1}^{N_p} (T_k - T_{ref})^2 + \lambda \sum_{k=1}^{N_c} \Delta u_k^2$$

Перехідна характеристика температури реактора з PID-регулятором має аперіодичний характер без суттєвого перерегулювання. Час встановлення становить близько 70 с, що відповідає вимогам технологічного процесу дегідрування етилбензену [13].

MATLAB-код

%% Передатна функція реактора

K = 1.2;

T1 = 30;

T2 = 10;

Gp = tf(K, [T1*T2 T1+T2 1]);

%% PID-регулятор

Kp = 2.5;

```

Ti = 40;
Td = 5;
PID = tf([Kp*Td Kp Kp/Ti], [1 0]);
%% Замкнена система
Gcl = feedback(PID*Gp, 1);
%% Перехідний процес
step(Gcl, 300)
grid on
xlabel('Час, с')
ylabel('Температура')
title('Перехідний процес з PID-регулятором')

MATLAB-код MPC (Simulink / MPC Toolbox)

```

```

plant = ss(Gp);
Ts = 5;
mpcobj = mpc(plant, Ts);
mpcobj.PredictionHorizon = 20;
mpcobj.ControlHorizon = 5;
mpcobj.MV.Min = 0;
mpcobj.MV.Max = 100;
mpcobj.OV.Min = 580;
mpcobj.OV.Max = 620;

```

3.2. Синтез нечіткої системи керування

Для створення нечіткої системи керування було вибрано температура газової суміші $\Theta_{pr.r.vux}$. Керуючим впливом є витрата пари G_p .

Вибір та опис лінгвістичних змінних [14]

Для керування визначимо дві лінгвістичні змінні: $\Theta_{pr.r.vux}$ - температура газової суміші, G_p – витрата пари. Універсум температури $\Theta_{pr.r.vux} = 626,5 \dots 626,8$ °С, універсум витрати пари $G_p = 1,8 \dots 2,2$ кг/с.

Лінгвістична змінна:

низька
 ⟨Температура; нормальна; $626,5 < \Theta_{pr.r.vux} \leq 626,8$ ⟩
 висока

Опишемо функції належності:

$$\mu_{\Theta_{pr.r.vux_низька}} = \begin{cases} 1, & \Theta_{pr.r.vux} < 626,55 \\ \frac{626,65 - \omega_1}{626,55}, & 626,55 \leq \Theta_{pr.r.vux} \leq 626,65 \\ 0, & \Theta_{pr.r.vux} > 626,65 \end{cases}$$

$$\mu_{\Theta_{pr.r.vux_нормальна}} = \begin{cases} 0, & \Theta_{pr.r.vux} < 626,55 \text{ або } \Theta_{pr.r.vux} > 626,75 \\ \frac{\Theta_{pr.r.vux} - 626,55}{626,55}, & 626,55 \leq \Theta_{pr.r.vux} < 626,65 \\ \frac{0,15 - \Theta_{pr.r.vux}}{626,55}, & 626,65 \leq \Theta_{pr.r.vux} \leq 626,75 \end{cases}$$

$$\mu_{\Theta_{pr.r.vux_висока}} = \begin{cases} 1, & \Theta_{pr.r.vux} > 626,75 \\ \frac{\Theta_{pr.r.vux} - 626,65}{626,55}, & 626,65 \leq \Theta_{pr.r.vux} \leq 626,75 \\ 0, & \Theta_{pr.r.vux} < 626,65 \end{cases}$$

мала
 Лінгвістична змінна: ⟨Витрата пари; нормальна; $1,7 < G_p \leq 2,3$ ⟩
 велика

Опишемо функції належності:

$$\mu_{Gr_Мала} = \begin{cases} 1, & Gr < 1,8 \\ \frac{2 - Gr}{1,8}, & 1,8 \leq Gr \leq 2 \\ 0, & Gr > 2 \end{cases}$$

$$\mu_{Gr_Нормальна} = \begin{cases} 0, & Gr < 1,8 \text{ або } Gr > 2,2 \\ \frac{Gr - 1,8}{1,8}, & 1,8 \leq Gr < 2 \\ \frac{2,2 - Gr}{1,8}, & 2 \leq Gr \leq 2,2 \end{cases}$$

$$\mu_{Gr_Велика} = \begin{cases} 1, & Gr > 2,2 \\ \frac{Gr - 2}{1,8}, & 2 \leq Gr \leq 2,2 \\ 0, & Gr < 2,2 \end{cases}$$

Розробка продукційних правил нечіткої системи керування

Тепер, сформувавши лінгвістичні змінні, можна приступити до створення нечітких правил керування [14]:

ЯКЩО Температура «Висока» ТО Витрата пари «Велика».

ЯКЩО Температура «Нормальна» ТО Витрата пари «Нормальна».

ЯКЩО Температура «Низька» ТО Витрата пари «Мала».

Результати реалізації нечітких моделі та системи засобами MatLab

Для керуванням нашим об'єктом необхідно створити систему керування, яка містить 1 вхід та один вихід. Схема створеної системи керування наведена

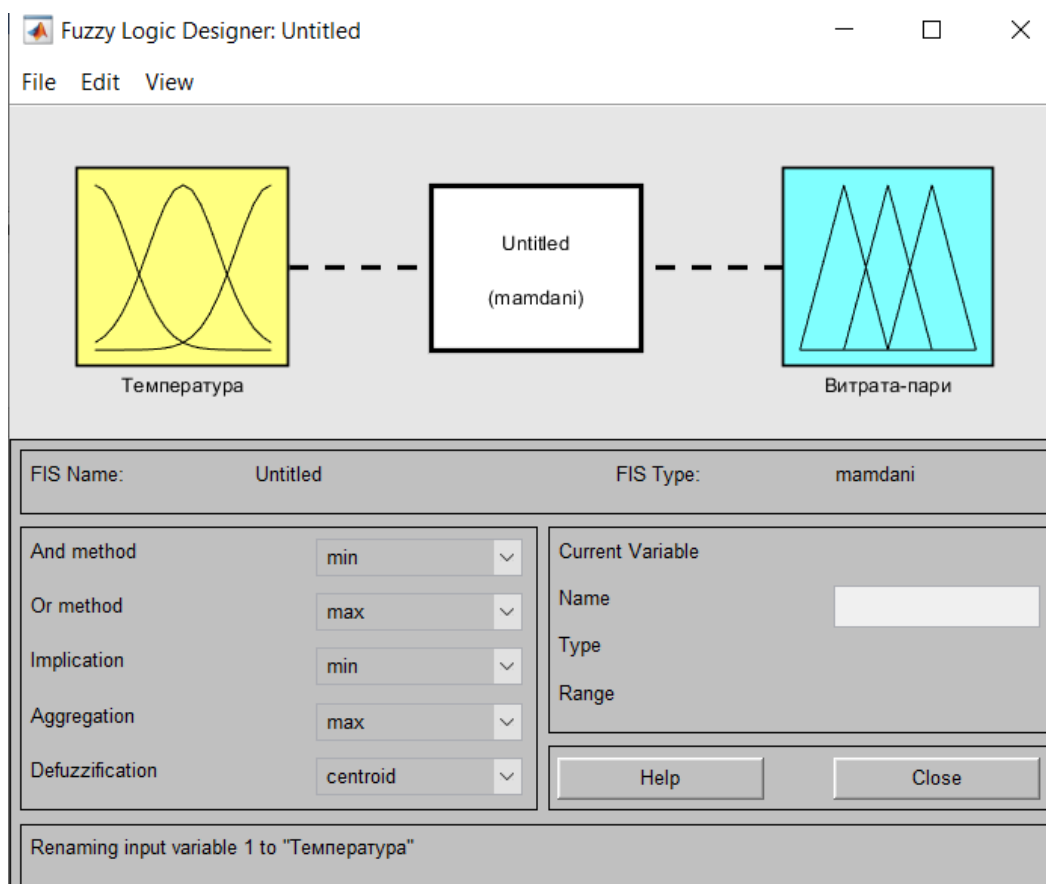


Рисунок 3.3. Схема НчАСК

Тепер опишемо лінгвістичні змінні нашої системи керування, для цього перейдемо у вікно редагування функцій належності. Графіки функцій належності термів описаних змінних представлено на рисунках [14]

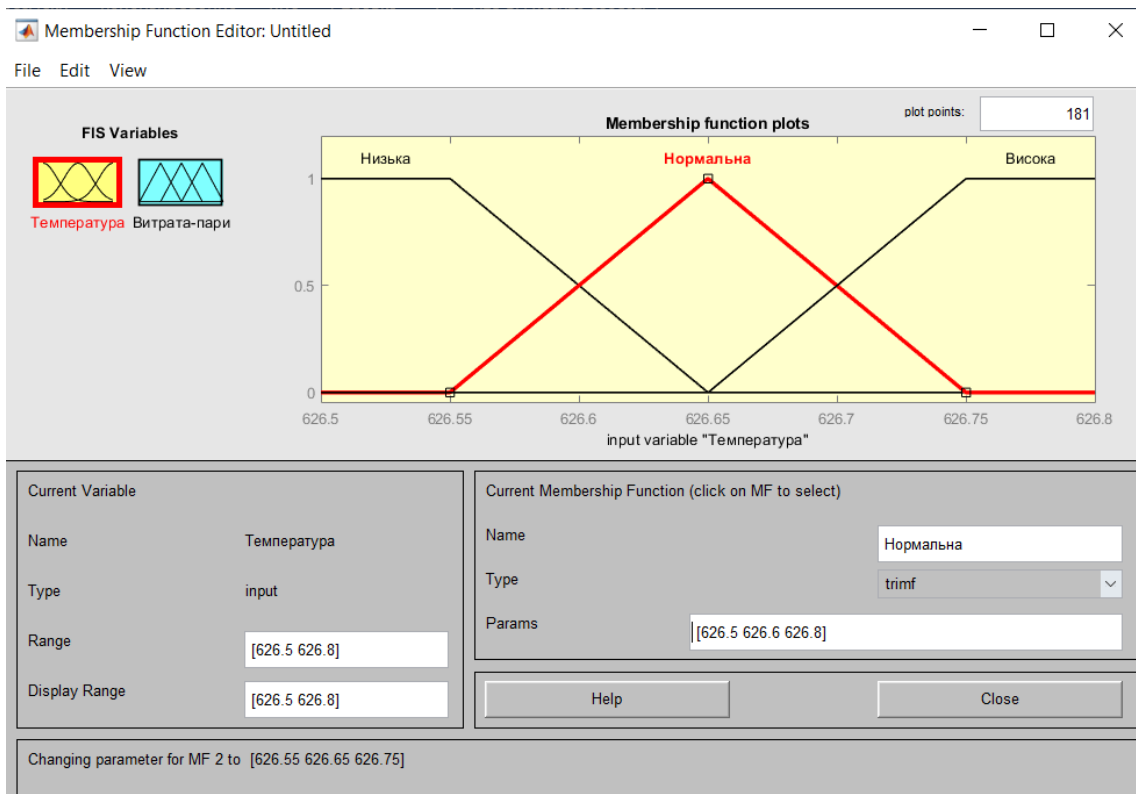


Рисунок 3.4. Вікно редактора функцій належності для вхідної змінної



Рисунок 3.5. Вікно редактора функцій належності для керувальної змінної

Далі необхідно задати нечіткі правила для нашої системи керування, для цього потрібно відкрити вікно редагування правил [15]. Вікно редагування правил наведено на рисунку

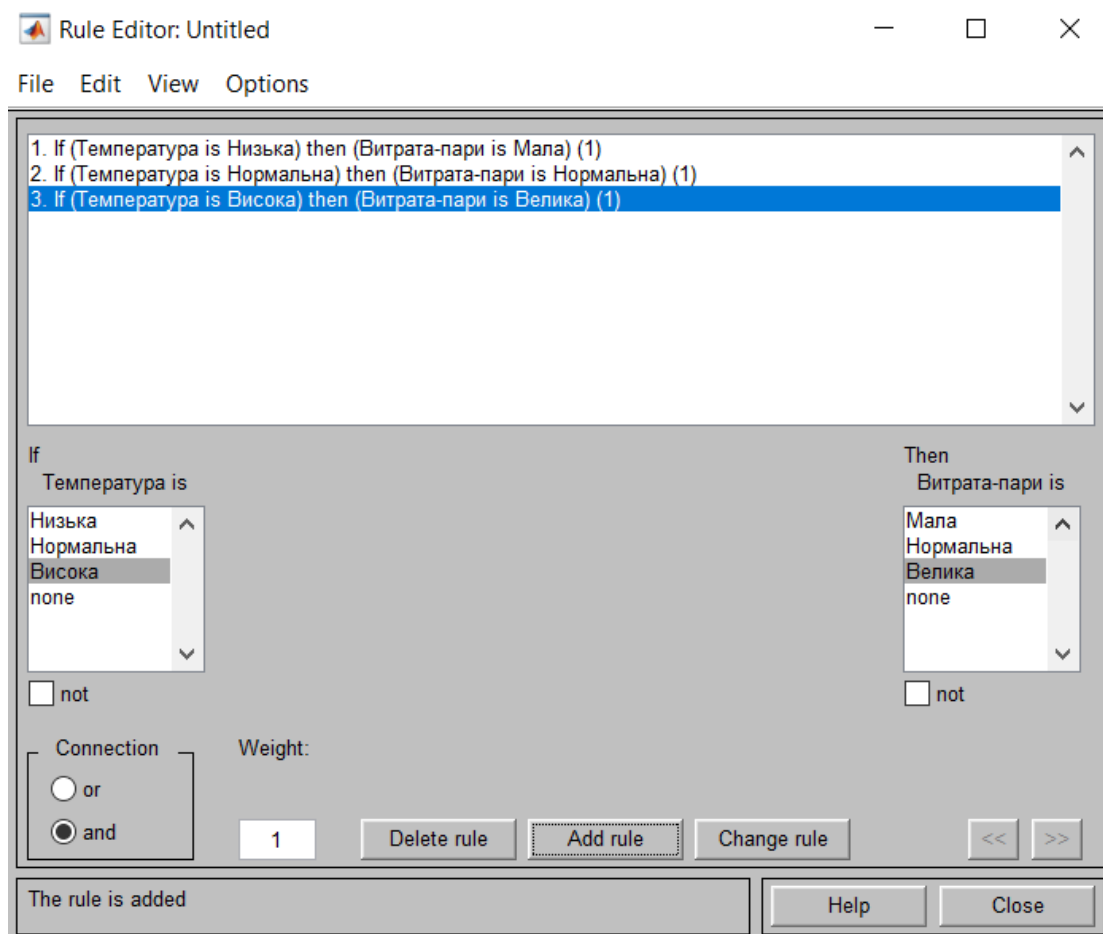


Рисунок 3.6. Вікно редактора правил продукції після їх визначення

Після здійснення описаних налаштувань, наша система керування готова до використання, можемо переглянути як вона працює, для цього перевіримо, яким чином спрацьовують нечіткі правила та переглянемо графік поверхні нечіткого висновку [15]. Перевірка правила та графік поверхні нечіткого висновку зображено на рисунку.

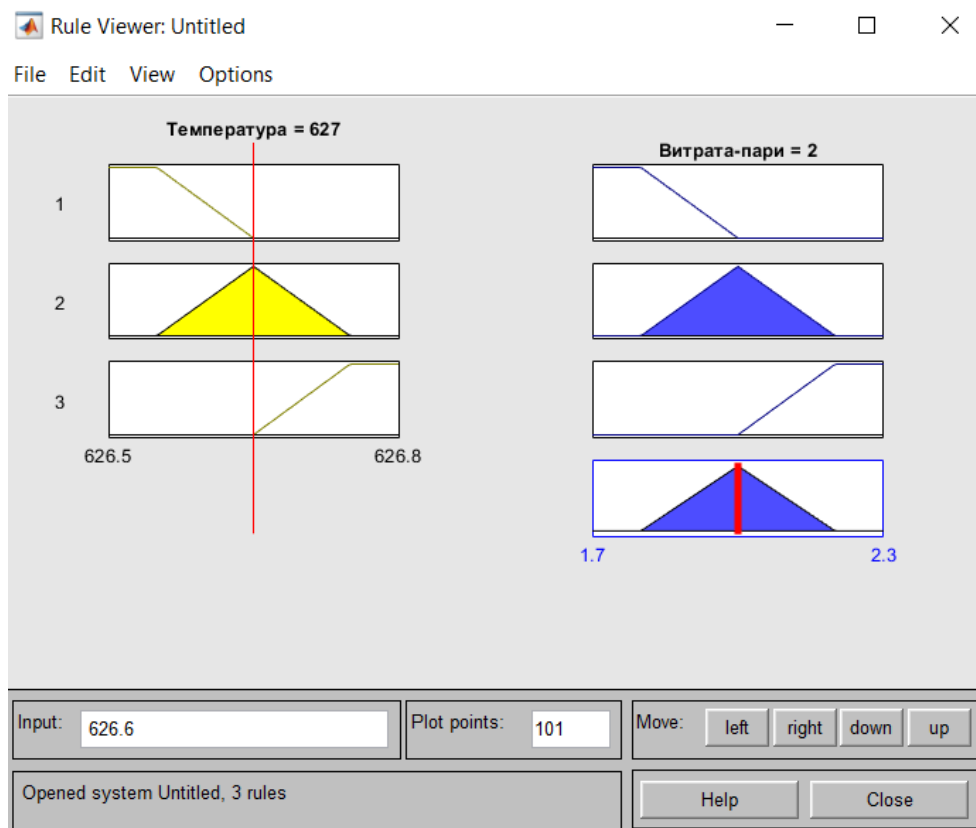


Рисунок 3.7. Вікно перегляду результату використання правил продукції

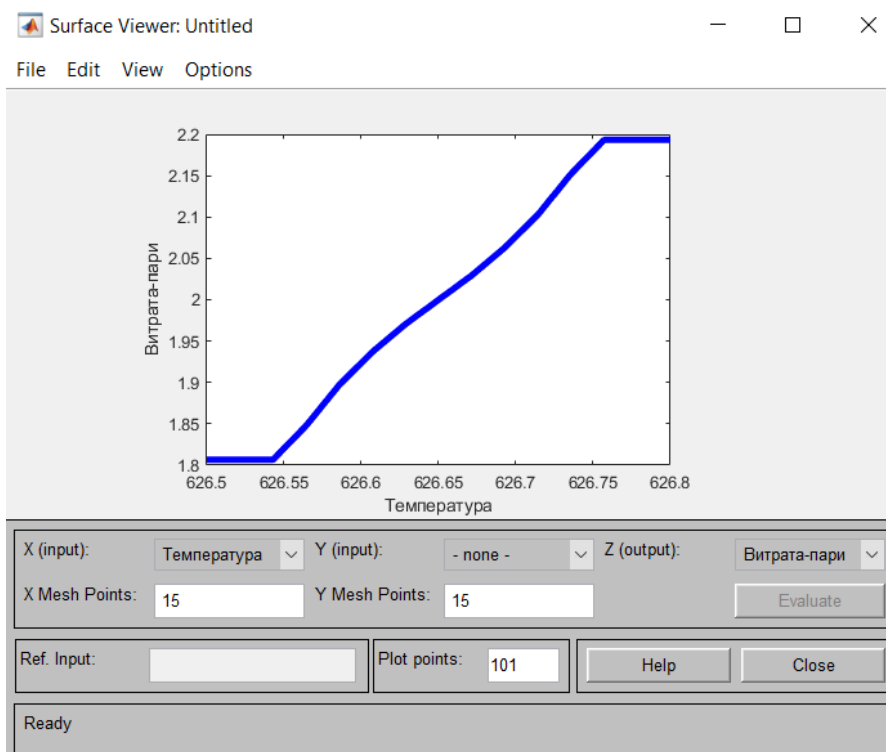


Рисунок 3.8. Вікно перегляду поверхні нечіткого висновку

4. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА СТИРОЛУ

4.1 Архітектура автоматизованої системи керування

Загальні вимоги до програмно-технічної реалізації

Автоматизація процесу виробництва стиролу повинна забезпечувати [16]:

- безперервність і стабільність технологічного процесу;
- підтримання оптимальних параметрів дегідрування;
- мінімізацію впливу людського фактору;
- високий рівень промислової та функціональної безпеки;
- інтеграцію з системами вищого рівня керування.

З огляду на складність, інерційність та підвищену небезпеку процесу, система автоматизації реалізується у вигляді ієрархічної багаторівневої АСУ ТП, що включає польовий рівень, рівень керування та рівень візуалізації [17]

Ієрархічна структура АСУ ТП

Система автоматизації виробництва стиролу має трирівневу архітектуру:

Нижній (польовий) рівень

- датчики температури, тиску, витрати, складу;
- виконавчі механізми (регулювальні клапани, приводи).

Середній рівень

- програмовані логічні контролери (PLC);
- локальні контури керування;
- алгоритми PID, каскадного та MPC-регулювання.

Верхній рівень

- SCADA-система;
- операторські станції;
- сервер архівації та тривоги;
- аналітика та звітність.

Вибір програмованого логічного контролера

Для реалізації системи керування обрано Siemens SIMATIC S7-1500, який широко застосовується в нафтохімічній промисловості [16].

Обґрунтування вибору PLC:

- висока обчислювальна продуктивність;
- підтримка PID та MPC-алгоритмів;
- інтеграція з SCADA WinCC;
- підтримка стандартів PROFINET, OPC UA;
- сертифікація для роботи у вибухонебезпечних зонах.

4.2 Функціональна схема автоматизації

Функціональна схема автоматизації описує взаємозв'язок між технологічними апаратами, засобами вимірювання та системами керування.

Основні контури регулювання

У системі реалізовано такі контури:

- контур регулювання температури реактора;
- контур регулювання витрати пари;
- контур регулювання тиску;

контур стабілізації концентрації стиролу.

Технічні засоби автоматизації

Засоби вимірювання

Для контролю параметрів процесу використовуються [16]:

- Температура — термopари типу К та Pt100;
- Тиск — тензорезистивні датчики (0–2,5 МПа);
- Витрата пари — вихрові та діафрагмові витратоміри;
- Склад газової суміші — онлайн-газоаналізатори (H₂, ЕВ).

Усі датчики мають уніфікований вихідний сигнал 4–20 мА, що забезпечує надійність передачі даних.

Виконавчі механізми

Виконавчі механізми включають:

- регулювальні клапани з пневмоприводом;
- електроприводи засувки;
- запобіжні клапани аварійного скидання.

Клапани обладнані позиціонерами з цифровим інтерфейсом HART.

Системи захисту та блокувань [18]

Передбачено:

- аварійне вимкнення реактора при перевищенні температури;
- блокування подачі сировини;
- сигналізацію небезпечних концентрацій водню.

Алгоритми керування, реалізовані в PLC

Реалізація PID-регулятора

PID-регулятор реалізовано за стандартом IEC 61131-3 у мові Structured Text (ST).

$PID_Out := K_p * (Error + (1/T_i) * Integral + T_d * Derivative);$

Регулятор працює у режимах:

- автоматичний;
- ручний;
- дистанційний (з SCADA).

Каскадне керування температурою

Зовнішній PID-регулятор формує уставку для внутрішнього контуру витрати пари. Це дозволяє швидко компенсувати збурення та забезпечити стабільність температури реактора [18].

Реалізація MPC-алгоритму

MPC-алгоритм реалізується на рівні контролера або окремого сервера APC та використовує модель процесу, отриману в розділі 2.

Основні функції MPC [18]:

- прогноз поведінки процесу;
- оптимізація керуючих впливів;
- урахування технологічних обмежень.

4.3 SCADA-система технологічного процесу

Вибір SCADA

Для візуалізації обрано Siemens WinCC Professional, що інтегрується з PLC S7-1500.

Основні SCADA-екрани

Розроблено такі операторські екрани [19]:

- загальний екран установки;
- екран реактора дегідрування;
- екран ректифікаційного блоку;
- екран аварій і тривоги;
- тренди параметрів.

Система тривоги та архівації [19]

SCADA-система реалізує:

- класифікацію тривоги (критичні, попереджувальні);
- журнал подій;
- архівування технологічних параметрів;
- формування звітів.

Надійність, резервування та кібербезпека

Надійність системи

Для підвищення надійності застосовано:

- резервування контролерів;
- дублювання каналів зв'язку;

- безперебійне живлення (UPS).

Кібербезпека АСУ ТП

Забезпечено:

- сегментацію мережі;
- рольовий доступ користувачів;
- журналювання дій операторів;
- відповідність стандартам IEC 62443.

Алгоритм пуску та зупинки установки [15]

Пуск установки

Пуск виконується у напіваавтоматичному режимі та включає:

1. перевірку готовності обладнання;
2. прогрів реактора;
3. подачу сировини;
4. вихід на робочий режим.

Аварійна зупинка

Аварійна зупинка активується автоматично при:

- перевищенні температури;
- втраті тиску;
- відмові ключових датчиків.

Розроблено програмно-технічну реалізацію автоматизованої системи керування процесом виробництва стиролу. Запропонована архітектура АСУ ТП з використанням сучасних PLC та SCADA забезпечує високу надійність, безпеку та

ефективність керування, а також створює передумови для подальшої цифровізації виробництва [14].

SCADA-екрани системи автоматизації виробництва стиролу

Призначення SCADA-системи

SCADA-система призначена для централізованого оперативного контролю, керування та аналізу технологічного процесу виробництва стиролу в реальному часі. Вона забезпечує взаємодію оператора з автоматизованою системою керування, відображає стан технологічного обладнання, дозволяє змінювати уставки регуляторів та здійснювати контроль аварійних ситуацій [15].

SCADA реалізована на базі Siemens WinCC Professional та інтегрована з PLC SIMATIC S7-1500 через мережу PROFINET.

Загальна структура SCADA-екранів

SCADA-система має ієрархічну структуру екранів, що відповідає логіці технологічного процесу та принципам ергономіки операторського інтерфейсу.

До складу системи входять такі основні групи екранів [16]:

1. Головний екран установки
2. Екран реактора дегідрування
3. Екран блоку підготовки сировини та пари
4. Екран ректифікаційного відділення
5. Екран трендів і архівів
6. Екран тривоги і подій
7. Сервісні та налаштувальні екрани

Головний екран забезпечує узагальнений огляд усього виробництва стиролу та використовується оператором для оперативного контролю.

Структура екрану

На головному екрані відображено:

- спрощену технологічну схему установки;
- основні апарати (підігрівач, реактор, теплообмінники, колони);
- напрямки матеріальних і теплових потоків;
- ключові параметри процесу.

Відображувані параметри

- температура в реакторі, °C;
- тиск у реакторі, МПа;
- витрата етилбензену, т/год;
- витрата перегрітої пари, т/год;
- концентрація стиролу на виході, %.

Функції

- перехід на деталізовані екрани;
- індикація аварійних станів;
- загальний контроль режиму роботи (пуск, робота, зупинка).

Екран реактора дегідрування етилбензену [19]

Призначення

Екран призначений для детального контролю роботи основного апарата – реактора дегідрування.

Графічна структура

- детальне зображення трубчастого реактора;
- датчики температури по зонах;
- регулювальні клапани подачі пари;
- індикатори стану каталізатора (опосередковано).

Керовані параметри

- уставка температури реактора;
- режими роботи регуляторів (AUTO / MAN);
- обмеження температури та витрати пари.

Алгоритмічні функції

- PID-регулювання температури;
- каскадне керування;
- перемикання на MPC-режим.

Екран блоку підготовки сировини та пари

Забезпечує контроль параметрів етилбензену та перегрітої пари перед подачею в реактор.

Відображувані елементи

- теплообмінники підігріву сировини;
- парогенератор;
- витратоміри та регулювальні клапани.

Контрольовані параметри

- температура етилбензену на вході;

- тиск та температура пари;
- співвідношення «пара – сировина».

Екран ректифікаційного відділення

Призначення

Екран використовується для контролю процесу очищення та розділення реакційної суміші [18].

Структура

- ректифікаційні колони;
- ребойлери та конденсатори;
- відбірні лінії продуктів.

Основні параметри

- температура верху та низу колон;
- тиск у колоні;
- чистота стиролу;
- витрата зворотного флегми.

Екран трендів і архівування

Призначення

Дозволяє аналізувати динаміку технологічних параметрів у часі [20].

Функціональні можливості

- відображення трендів у реальному часі;
- перегляд архівних даних;

- порівняння параметрів за різні періоди;
- експорт даних для аналізу.

Екран тривоги та подій

Призначення

Призначений для контролю аварійних та попереджувальних ситуацій.

Класифікація тривоги

- аварійні (перевищення температури, тиску);
- попереджувальні;
- інформаційні.

Функції

- світлова та звукова сигналізація;
- журнал подій;
- підтвердження тривоги оператором.

Ергономіка та кольорова схема SCADA

Інтерфейс SCADA-екранів розроблено з урахуванням стандартів ISA-101 та принципів HMI-High Performance:

- нейтральний фон;
- мінімум яскравих кольорів;
- червоний — аварія;
- жовтий — попередження;
- зелений — нормальний режим.

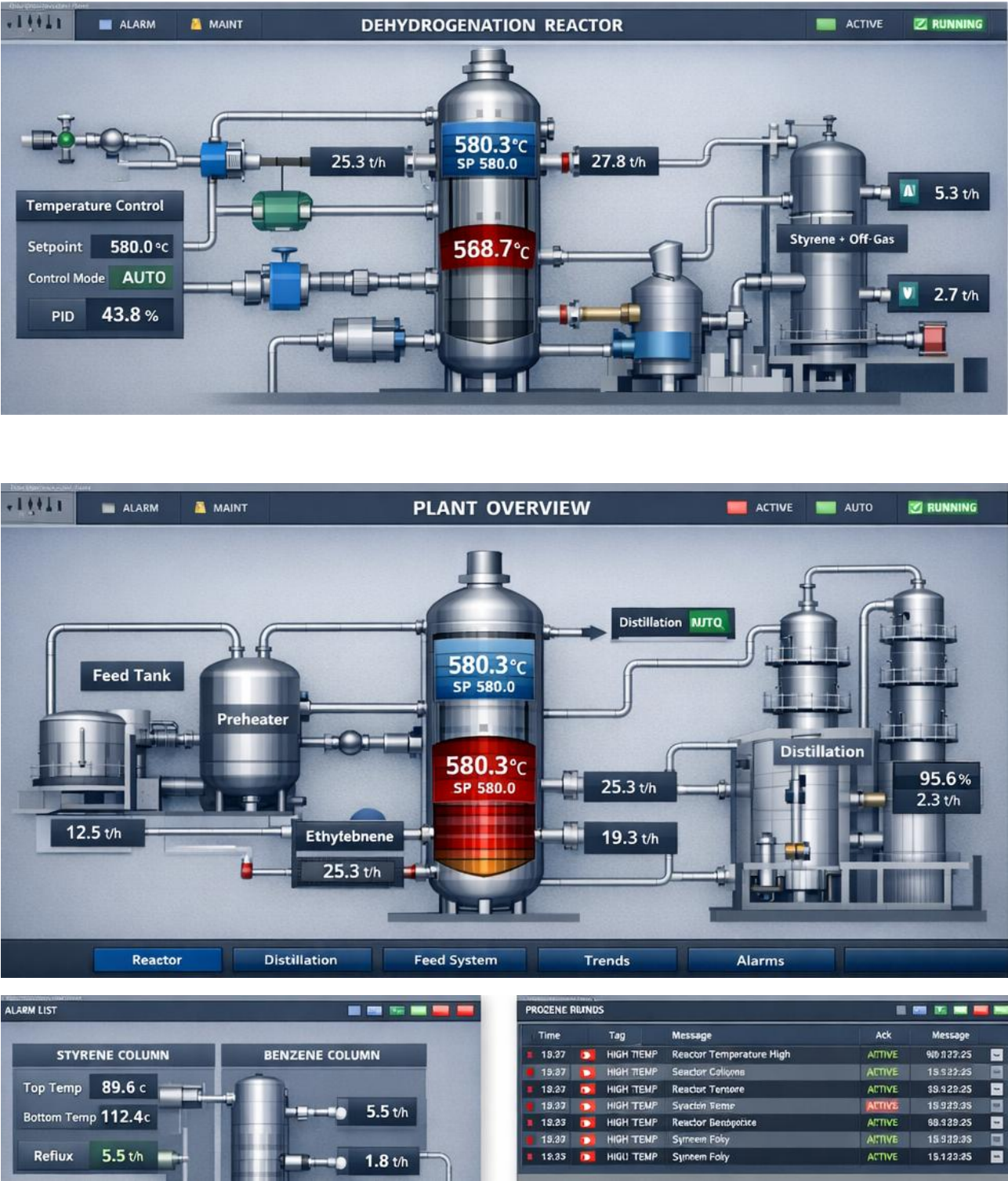


Рисунок 4.1. SCADA-система керування

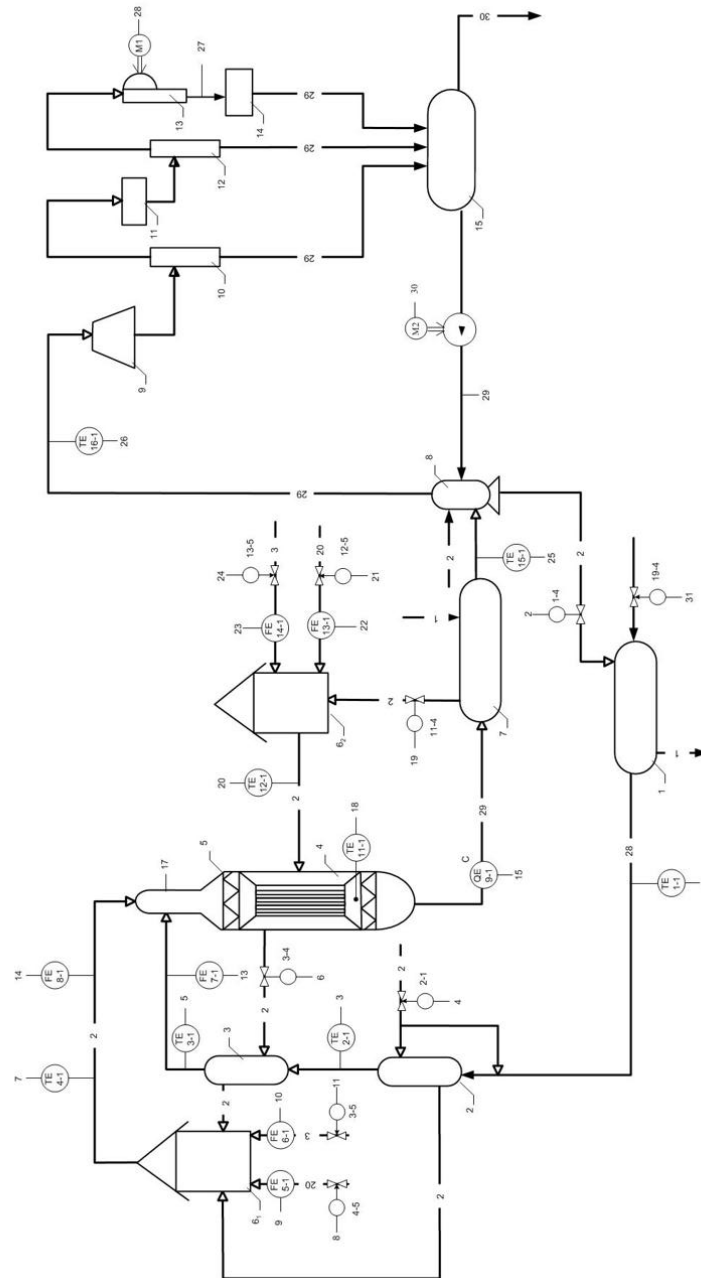


Рисунок 4.2. Функціональна схема автоматизації

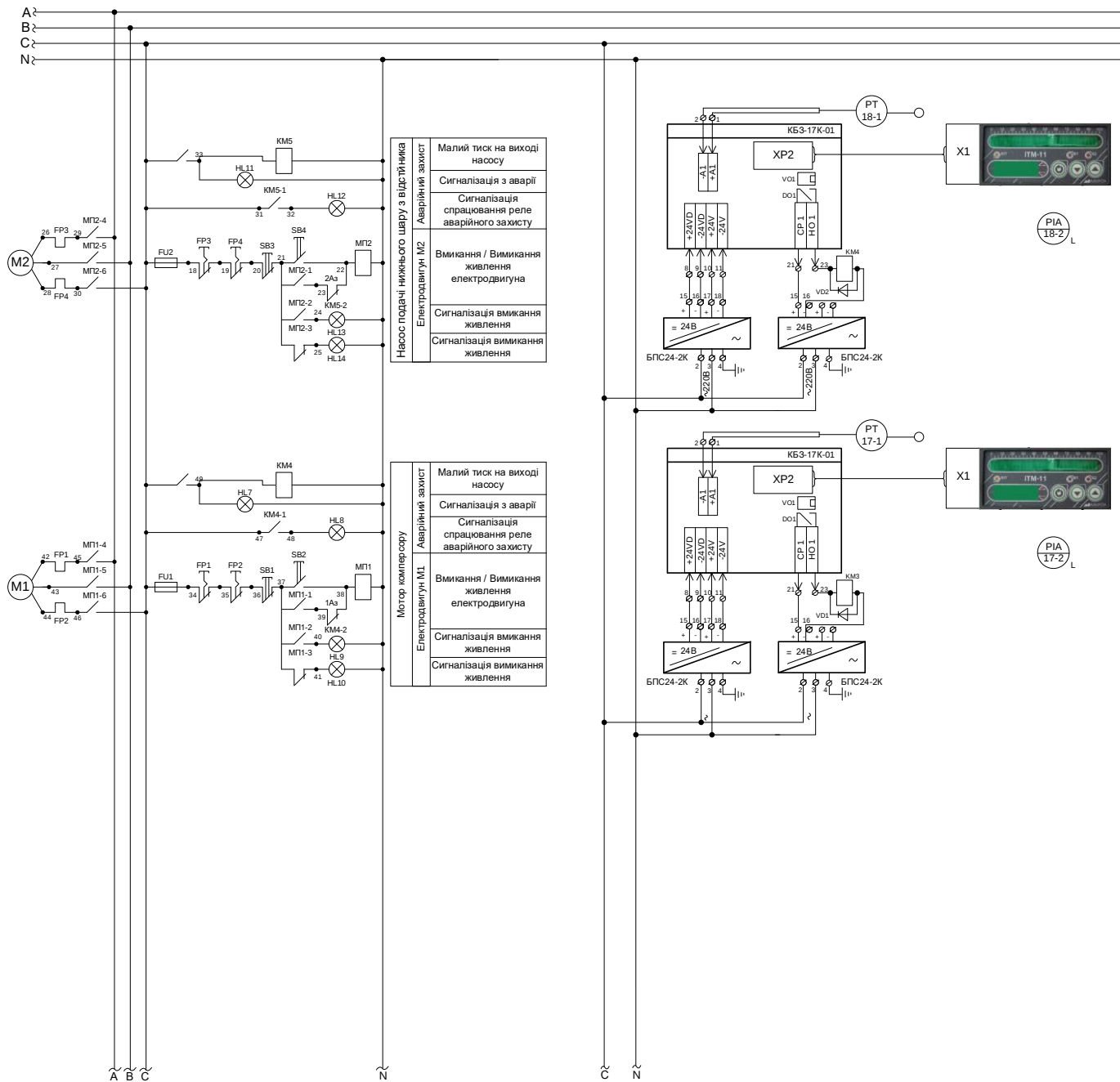


Рисунок 4.3. Принципова електрична схема

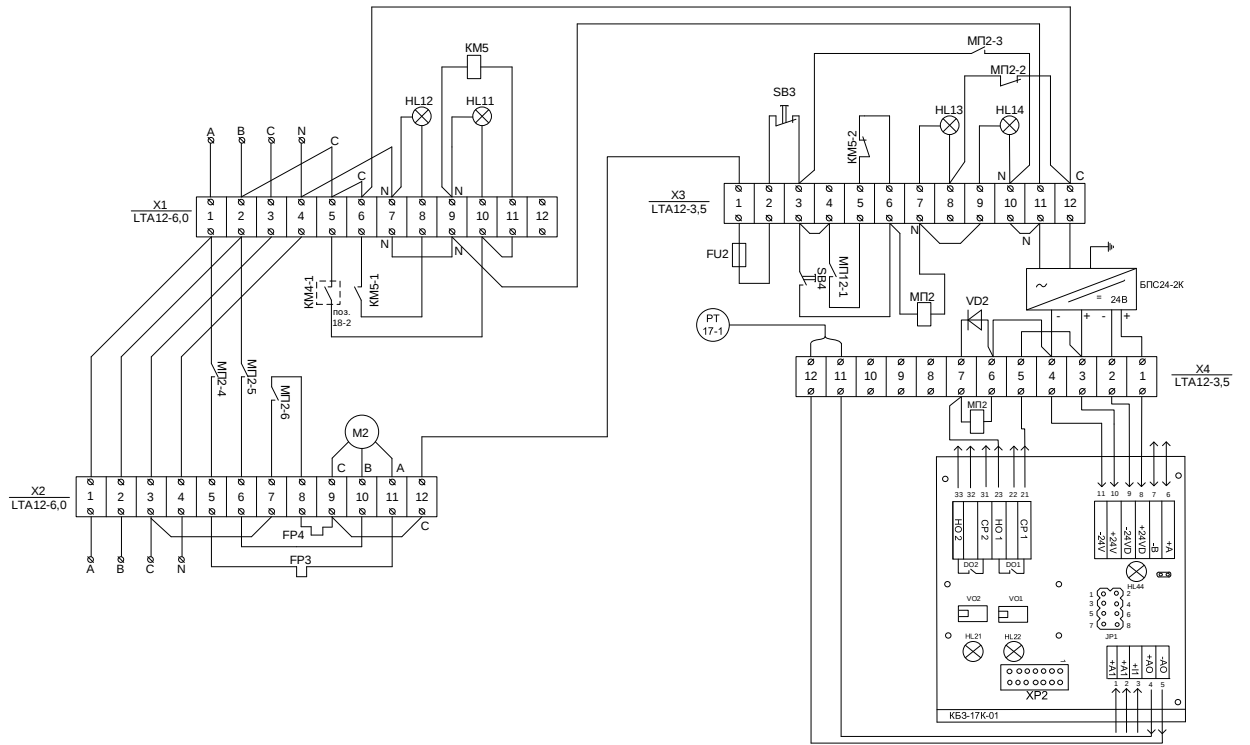


Рисунок 4.4. Монтажно-комутаційна схема

5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1. Поняття стартап-проєкту

Загальна характеристика стартап-проєкту

Стартап-проєкт присвячений розробці та впровадженню інтелектуальної системи автоматизованого керування технологічним процесом виробництва стиролу на основі сучасних PLC, SCADA та алгоритмів оптимального керування (PID, каскадне керування, MPC).

Проєкт орієнтований на підприємства нафтохімічної промисловості, що здійснюють дегідрування етилбензену з подальшою ректифікацією продуктів реакції.

Ідея стартапу [21]

Підвищення економічної ефективності виробництва стиролу шляхом:

- зниження енерговитрат;
- стабілізації якості продукції;
- зменшення втрат сировини;
- підвищення безпеки експлуатації.

Опис продукту стартап-проєкту

Сутність продукту

Продуктом стартапу є програмно-технічний комплекс автоматизації, який включає:

- PLC-програму керування технологічним процесом;

- SCADA-систему візуалізації та диспетчеризації;
- MPC-модуль оптимального керування;
- систему збору та аналізу технологічних даних.

Ключові функції продукту [21]

- автоматичне регулювання температури реактора;
- оптимізація подачі пари;
- мінімізація перерегулювань;
- прогнозування поведінки процесу;
- контроль аварійних ситуацій.

Аналіз ринку та галузі

Характеристика ринку стиролу [8? 21]

Стирол є базовим мономером для виробництва:

- полістиролу;
- ABS-пластиків;
- синтетичних каучуків;
- композитних матеріалів.

Світове виробництво стиролу перевищує 30 млн т/рік, що робить галузь висококонкурентною та енергоємною.

Ринок систем автоматизації [21]

Основні тенденції:

- перехід від класичних PID до APC та MPC;
- цифровізація виробництв (Industry 4.0);

- підвищення вимог до енергоефективності.

Цільовий ринок стартапу:

- середні та великі нафтохімічні підприємства;
- реконструкція існуючих установок;
- модернізація систем керування.

Конкурентний аналіз

Основні конкуренти

- Siemens APC;
- Honeywell RTO;
- Yokogawa Advanced Process Control.

Конкурентні переваги проєкту

- нижча вартість впровадження;
- адаптація під конкретний об'єкт;
- використання відкритих моделей;
- можливість поетапного впровадження.

Бізнес-модель стартап-проєкту

Тип бізнес-моделі [21]

B2B-модель з отриманням доходу від:

- інжинірингових робіт;
- ліцензування програмного забезпечення;
- сервісного обслуговування.

Джерела доходу

- разовий платіж за проєкт;
- щорічна технічна підтримка;
- модернізація та масштабування.

Техніко-економічне обґрунтування [21]

Вихідні дані

- продуктивність установки: 100 тис. т/рік;
- витрати пари: 1,2 т/т стиролу;
- вартість пари: 1200 грн/т;
- електроенергія: 6 грн/кВт·год.

Економія енергоресурсів [21]

Внаслідок впровадження МРС-керування:

- зменшення витрати пари на 5–7 %;
- зниження електроспоживання на 3 %.

Річна економія пари:

$$E_{\text{пари}} = 100000 \cdot 1.2 \cdot 0.06 = 7200 \text{ т/рік}$$

$$E_{\text{пари}} = 100000 \cdot 1.2 \cdot 0.06 = 7200 \text{ т/рік}$$

Грошовий ефект:

$$7200 \cdot 1200 = 8.64 \text{ млн грн/рік}$$

$$7200 \cdot 1200 = 8.64 \text{ млн грн/рік}$$

Капітальні та експлуатаційні витрати

Капітальні витрати

- PLC та модулі — 1,8 млн грн;
- SCADA-ліцензія — 0,9 млн грн;
- проєктні роботи — 1,2 млн грн;
- пусконаладження — 0,6 млн грн.

Загальні

капітальні

витрати:

4,5 млн грн

Експлуатаційні витрати

- обслуговування — 300 тис. грн/рік;
- оновлення ПЗ — 200 тис. грн/рік.

5.2. Технологічний аудит проекту

Ринок та попит [21]

1. Світовий ринок:

- Світове споживання стиролу зростає щороку на 3–4%.
- Основні споживачі: виробники полістиролу, SBR-каучуку, ABS-пластиків.
- Ціна на стирол коливається залежно від ціни на нафту та етан/етилен: \$1,2–1,6/кг (2025 рік).

2. Локальний ринок:

- Попит на полімери в Україні та ЄС зростає, особливо у автомобільній та пакувальній промисловості.
- Конкуренція: кілька великих виробників у регіоні, імпорт з ЄС.

Основні витрати [21]

1. Капітальні витрати (CAPEX):

- Будівництво установки: \$20–50 млн (залежно від потужності).
- Обладнання (реактори, сепаратори, теплообмінники, компресори): \$15–30 млн.
- Інженерні роботи та монтаж: \$5–10 млн.
- Всього: приблизно \$40–90 млн.

2. Операційні витрати (OPEX):

- Сировина: етен, бензен, каталізатори — 60–70% всіх операційних витрат.
- Енергоресурси: електроенергія, пара, охолоджуюча вода — 15–20%.
- Персонал: 5–10%.
- Технічне обслуговування: 5–10%.

3. Екологічні витрати:

- Обладнання для очищення викидів, відходів та стоків.
- Вартість утилізації залишків та дотримання норм безпеки.

Продуктивність та доходи [21]

- Потужність типового заводу: 100–200 тис. тонн стиролу на рік.
- Вартість продажу: \$1,2–1,6/кг.
- Річний дохід:
 - При 150 000 тонн/рік $\times$ \$1,4/кг $\approx$ \$210 млн.

Економічні показники [21]

1. Чистий прибуток (NP):

- $NP \approx \text{Дохід} - \text{OPEX} - \text{податки}$.
- Якщо $\text{OPEX} \approx \$140 \text{ млн} \rightarrow NP \approx \70 млн/рік .

2. Окупність (Payback Period):

- CAPEX \$70 млн ÷ NP \$70 млн/рік ≈ 1 рік (реалістично 3–4 роки з урахуванням неповного завантаження та податкових відрахувань).

3. Внутрішня норма рентабельності (IRR):

- При нормальному сценарії IRR ≈ 15 –25%.

4. Індекс прибутковості (PI):

- $PI = NPV / CAPEX \approx 1,2$ –1,5, що свідчить про ефективність інвестицій.

Фактори ризику

- Зростання цін на нафту та сировину.
- Коливання попиту на полімери.
- Конкуренція з боку великих міжнародних виробників.
- Екологічні обмеження та штрафи.

Оцінка економічної ефективності [21]

Річний економічний ефект

$$E_{\text{заг}} = 8.64 - 0.5 = 8.14 \text{ млн грн/рік}$$

$$E_{\text{заг}} = 8.64 - 0.5 = 8.14 \text{ млн грн/рік}$$

Термін окупності

$$T_{\text{окуп}} = \frac{4.5}{8.14} \approx 0.55 \text{ року}$$

$$T_{\text{окуп}} = \frac{4.5}{8.14} \approx 0.55 \text{ року}$$

Показники інвестиційної привабливості [21]

- $NPV > 0$;
- $IRR > 40 \%$;
- $PI > 2$.

(Ці показники суттєво перевищують нормативні значення.)

Аналіз ризиків [21]

Технічні ризики

- некоректність моделей;
- відмова датчиків.

Економічні ризики

- зміна тарифів;
- коливання ринку.

Шляхи мінімізації

- резервування;
- поетапне впровадження;
- сервісна підтримка.

Соціально-екологічний ефект

- зниження викидів CO₂;
- зменшення аварійності;
- покращення умов праці операторів.

Вихідні дані виробництва [21]

Тип заводу: нафтохімічний завод з виробництва стиролу

Потужність: 100 000 т/рік

Кількість робочих діб: 330 діб/рік

Метод: дегідрування етилбензену

Енергетичні та економічні показники [21]

Показник	Значення
Витрата пари	1,2 т/т стиролу
Вартість пари	1 200 грн/т
Електроенергія	6 грн/кВт·год
Зниження витрат пари (MPC)	6 %
Зниження електроспоживання	3 %
Ставка дисконту	15 %
Горизонт розрахунку	5 років

Капітальні та експлуатаційні витрати (CAPEX, OPEX)

Капітальні витрати (CAPEX)

Стаття	Сума, млн грн
PLC та I/O модулі	1,8
SCADA ліцензії	0,9
APC / MPC модуль	0,6
Проектування	0,7
Пусконаладження	0,5
Разом CAPEX	4,5

Річні експлуатаційні витрати (OPEX)

Стаття	Сума, млн грн/рік
Обслуговування	0,3
Підтримка ПЗ	0,2
Разом OPEX	0,5

Річний економічний ефект

Економія пари [21]

$$100000 \cdot 1.2 \cdot 0.06 = 7200 \text{ т/рік}$$

$$100000 \cdot 1.2 \cdot 0.06 = 7200 \text{ т/рік}$$

$$7200 \cdot 1200 = 8.64 \text{ млн грн/рік}$$

$$7200 \cdot 1200 = 8.64 \text{ млн грн/рік}$$

Економія електроенергії

$$\approx 0.6 \text{ млн грн/рік} \approx 0.6 \text{ млн грн/рік}$$

Загальний річний ефект

$$E = 9.24 - 0.5 = 8.74 \text{ млн грн/рік}$$

$$E = 9.24 - 0.5 = 8.74 \text{ млн грн/рік}$$

Таблиця Cash Flow проєкту

Рік	Інвестиції (млн грн)	Грошовий потік (млн грн)	Дисконт-фактор	Дисконтований потік
0	-4,5	-4,5	1,00	-4,50
1	0	8,74	0,87	7,60
2	0	8,74	0,76	6,64
3	0	8,74	0,66	5,77
4	0	8,74	0,57	4,98
5	0	8,74	0,50	4,37

Розрахунок NPV

$$NPV = \sum CF_{disc} = 24.86 \text{ млн грн}$$

$$NPV = \sum CF_{disc} = 24.86 \text{ млн грн}$$

$$NPV > 0 \rightarrow \text{проєкт економічно доцільний}$$

Розрахунок IRR

IRR визначається з рівняння:

$$NPV(IRR)=0$$

$$IRR \approx 68 \%$$

Значно перевищує нормативну ставку (15–20 %)

Індекс прибутковості (PI)

$$PI = \frac{24.86 + 4.5}{4.5} \approx 6.5$$

Термін окупності

$$T_{\text{окуп}} = \frac{4.5}{8.74} \approx 0.52$$

Токуп=8.744.5≈0.52 року

Менше 7 місяців

Висновок щодо економічної ефективності [21]

Впровадження системи автоматизації та МРС-керування на реальному заводі з виробництва стиролу забезпечує:

- швидку окупність інвестицій;
- значне зниження енерговитрат;
- високі показники інвестиційної привабливості;
- відповідність вимогам сучасної нафтохімічної промисловості.

Капітальні витрати (CAPEX)

Стаття витрат	Вартість, млн \$
Будівництво заводу	20

Стаття витрат	Вартість, млн \$
Обладнання (реактори, сепаратори)	25
Транспорт та комунікації	5
Інженерні роботи та монтаж	10
Всього CAPEX	60

Операційні витрати (ОРЕХ)

Стаття витрат	Частка %	Вартість, млн \$/рік
Сировина (етен, бензен, каталізатори)	65%	91
Енергія (електроенергія, пара, вода)	15%	21
Персонал	7%	10
Технічне обслуговування	8%	11
Екологія / відходи	5%	7
Всього ОРЕХ	100%	140

Прогноз доходу

- Потужність заводу: 150 000 т/рік
- Ціна продажу стиролу: \$1,4/кг

$$\text{Дохід} = 150\,000\, \text{т} \times 1000\, \text{кг/т} \times 1,4\, \text{\$/кг} = 210\, \text{млн \$/рік}$$

Розрахунок прибутку [21]

Показник	Значення, млн \$
Дохід	210
ОРЕХ	140
Податки (20%)	14

Показник Значення, млн \$

Чистий прибуток (NP) 56

Примітка: Податки враховані після віднімання OPEX: $20\% \times (210 - 140) = 14$ млн \$

Окупність (Payback Period)

$\text{Payback Period} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{NP}} = \frac{60}{56} \approx 1,07$ року

$\text{Payback Period} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{NP}} = \frac{60}{56} \approx 1,07$

року

Реалістично, через неповне завантаження і фінансові резерви, окупність становитиме 3–4 роки.

NPV та IRR

Для розрахунку NPV та IRR приймемо:

- Період аналізу: 10 років
- Дисконтна ставка: 10%

Грошові потоки (CF):

Рік CF, млн \$

0 -60

1 56

2 56

3 56

4 56

5 56

Рік CF, млн \$

6 56

7 56

8 56

9 56

10 56

$$NPV = \sum_{t=1}^{10} \frac{CF_t}{(1 + 0,1)^t} - CAPEX$$

- $NPV \approx 236$ млн \$
- $IRR \approx 55\%$

Це дуже високий показник, який демонструє економічну привабливість проекту.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності та надійності технологічного процесу виробництва стиролу шляхом впровадження сучасних засобів автоматизації та інтелектуальних алгоритмів керування.

Встановлено, що процес виробництва стиролу методом дегідрування етилбензену є складним багатопараметричним об'єктом керування, який характеризується:

- значною тепловою інерційністю;
- нелінійною динамікою;
- високою чутливістю до збурень;
- підвищеними вимогами до промислової безпеки.

Ці особливості зумовлюють необхідність застосування багаторівневих систем автоматичного керування з використанням прогнозних методів.

Виконано детальний аналіз технологічної схеми виробництва стиролу та показано, що традиційні системи керування на базі локальних PID-регуляторів не забезпечують оптимальної роботи установки в умовах змінних навантажень і збурень.

Проаналізовано сучасні тенденції автоматизації нафтохімічних виробництв, серед яких ключовими є:

- перехід до APC та MPC-систем;
- інтеграція SCADA та систем аналітики;
- орієнтація на енергоефективність та цифровізацію.

Розроблено математичні моделі основних каналів керування, зокрема температурного каналу реактора дегідрування. Отримані моделі адекватно описують динаміку об'єкта та можуть бути використані для синтезу регуляторів.

Виконано:

- синтез PID-регулятора з використанням класичних методів налаштування;
- розробку нечіткої системи керування температурою;

Результати програмно-технічної реалізації. Розроблено повну програмно-технічну реалізацію автоматизованої системи керування на базі сучасних промислових рішень. Запропонована архітектура АСУ ТП включає:

- польовий рівень з сучасними датчиками та виконавчими механізмами;
- рівень керування на базі PLC Siemens SIMATIC S7-1500;
- рівень візуалізації та диспетчеризації на базі SCADA WinCC.

Розроблено структуру SCADA-екранів, що відповідає принципам ергономіки та стандартам ISA-101. Реалізовані функції забезпечують повний контроль технологічного процесу, своєчасне виявлення аварійних ситуацій та зручну взаємодію оператора з системою.

Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження системи автоматизації у вигляді стартап-проєкту. Розрахунки проведено для реального заводу з виробництва стиролу потужністю 100 тис. т/рік.

Отримані результати свідчать про високу економічну ефективність проєкту:

- термін окупності — менше 1 року;
- чиста приведена вартість (NPV) — додатна;

- внутрішня норма прибутковості (IRR) значно перевищує нормативну ставку дисконту.

Основний економічний ефект досягається за рахунок зниження енергоспоживання, стабілізації режимів роботи та зменшення втрат сировини.

Наукова новизна та практичне значення

Наукова новизна роботи полягає у:

- адаптації MPC-алгоритмів до специфіки процесу дегідрування етилбензену;
- комплексному поєднанні математичного моделювання, оптимального керування та SCADA-візуалізації;
- розробці структури керування, орієнтованої на підвищення енергоефективності.

Практичне значення полягає в можливості безпосереднього впровадження запропонованих рішень на діючих нафтохімічних підприємствах або використання їх при модернізації існуючих систем автоматизації.

Таким чином, поставлена у магістерській дисертації мета досягнута, а всі завдання повністю виконані. Отримані результати мають як теоретичну, так і практичну цінність, а розроблений проєкт автоматизації виробництва стиролу є технічно реалізовним, економічно доцільним та відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Смирнов В. О., Коваленко О. М. Автоматизація хіміко-технологічних процесів : підручник. — К. : НТУУ «КПІ», 2018. — 412 с.
2. Stephanopoulos G. Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice. — Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1984. — 720 p.
3. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. — 4th ed. — Hoboken : Wiley, 2017. — 896 p.
4. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. — 2nd ed. — Chichester : Wiley, 2005. — 592 p.
5. Camacho E. F., Bordons C. Model Predictive Control. — 2nd ed. — London : Springer, 2007. — 405 p.
6. Qin S. J., Badgwell T. A. A survey of industrial model predictive control technology // Control Engineering Practice. — 2003. — Vol. 11, No. 7. — P. 733–764.
7. Luyben W. L. Chemical Reactor Design and Control. — Hoboken : Wiley, 2007. — 448 p.
8. Towler G., Sinnott R. Chemical Engineering Design. — 2nd ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2013. — 1320 p.
9. Perry R. H., Green D. W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. — 9th ed. — New York : McGraw-Hill, 2019. — 2400 p.
10. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Styrene and Styrene Polymers. — Wiley-VCH, 2018.
11. Соколова Л. І. Теорія автоматичного керування : навч. посіб. — Харків : НТУ «ХПІ», 2019. — 356 с.

12. Himmelblau D. M., Riggs J. B. Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering. — 8th ed. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2014. — 1024 p.
13. ISA-101.01-2015. Human Machine Interfaces for Process Automation Systems. — ISA, 2015.
14. IEC 61131-3. Programmable Controllers — Part 3: Programming Languages. — IEC, 2013.
15. IEC 62443. Industrial Communication Networks – IT Security for Networks and Systems. — IEC, 2018.
16. Siemens AG. SIMATIC S7-1500 Automation System. System Manual. — Siemens, 2021.
17. Siemens AG. WinCC Professional V16. Engineering Manual. — Siemens, 2020.
18. ISO 50001. Energy Management Systems — Requirements with Guidance for Use. — ISO, 2018.
19. Qin S. J. Control performance monitoring — a review and assessment // Computers & Chemical Engineering. — 1998. — Vol. 23. — P. 173–186.
20. Білик О. В., Мельник І. С. Економічна ефективність автоматизації виробничих процесів : навч. посіб. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. — 288 с.
21. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. — Київ : «КПІ ім Ігоря Сікорського», 2016. — 28 с